

Julio 2022
Diciembre

e-ISSN 2389-9484







Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías.

Volumen 9 | Número 2



Revista Ciencia e Ingeniería, vol. 9, n.º 2, e7460792, 2022.
http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei

Ciencia e Ingeniería
Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías
ISSN 2389-9484
Año 2022, julio-diciembre, Vol. 9, N.º 2, e7460792
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas y *Facultad Ingeniería*. Universidad de La Guajira
La Guajira, Riohacha, Colombia
http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei
Este documento fue depositado en Zenodo. DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.7460792

CARRETERAS SOLARES: ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL

Solar roads: sustainable alternative for road infrastructure

Camila Andrea Chaparro Brito
https://orcid.org/0000-0002-4470-6721.
cachaparro@uniguajira.edu.co
Ingeniera civil. Universidad de La Guajira, Colombia

Nathalis Paola Peña Rodríguez
https://orcid.org/0000-0003-2607-3198.
nppena@uniguajira.edu.co
Ingeniera civil. Universidad de La Guajira, Colombia

Hobber Berrio Caballero
https://orcid.org/0000-0002-2720-5431,
hberrio@uniguajira.edu.co
Dr. Ciencias gerenciales. Facultad de ingeniería, Universidad de La Guajira. Colombia

Andrés Vides Prado
https://orcid.org/0000-0002-0435-9331
Avidesp@uniguajira.edu.co
Magister en energías renovables en sistemas eléctricos. Facultad de ingeniería, Universidad de La Guajira. Colombia

RESUMEN

Este artículo tiene como propósito reflexionar sobre las carreteras solares como alternativa de sostenibilidad en la infraestructura vial. La estructura de este estudio se fundamenta en el enfoque post positivista soportado en el método hermenéutico en contexto teórico documental, tomando la revisión exhaustiva de bases de datos oficiales que permitieron una consulta a más de 30 artículos científicos y trabajos de tesis relacionados con carreteras solares, el diseño de la estructura del pavimento fotovoltaico, así también, el análisis de proyectos desarrollados, las ventajas y desventajas. Los prototipos mencionados han realizado estudios de estructura para soportar las mismas cargas dinámicas de un pavimento convencional. En suma, los estudios de carreteras solares como alternativa para la sostenibilidad de la infraestructura vial se encuentran en desarrollo, por lo tanto, este trabajo será de gran utilidad para futuras investigaciones, al definir un punto de partida teórico que contrasta avances de esta tecnología, asimismo, el análisis de una opción sostenible para reducir los daños ambientales ocasionados por las carreteras convencionales.

Palabras clave: energías renovables, carretera/pavimento solar, generación de energía, sostenibilidad, infraestructura vial.

ABSTRACT

The purpose of this article is to reflect on solar roads as an alternative for the sustainability of road infrastructure. The structure of this study is based on the post-positivist approach supported by the hermeneutical method in a theoretical documentary context, taking the exhaustive review of official databases that allowed a consultation of more than 30 scientific articles and thesis works related to solar roads, the design of the photovoltaic pavement structure, as well as the analysis of developed projects, the advantages, and disadvantages. The prototypes have conducted structural studies to support the same dynamic loads of conventional pavement. In short, studies of solar roads as an alternative for the sustainability of road infrastructure are under development, therefore, this work will be especially useful for future research, by defining a theoretical starting point that contrasts advances in this technology, Likewise, the analysis of a sustainable option to reduce the environmental damage caused by conventional roads.

Keywords: renewable energies, solar road, solar pavement, power generation, sustainability, road infrastructure.

Recibido: 03 de mayo de 2022
Aceptado: 31 de agosto de 2022



Introducción

El mundo se ha enfrentado a grandes retos energéticos y medioambientales, al tiempo que avanza en la búsqueda de alternativas para la producción de electricidad que puedan satisfacer las demandas energéticas con sistemas sostenibles, conjugadas con estrategias que minimicen los impactos ocasionados por el uso de combustible fósiles y las actividades que buscan el crecimiento y desarrollo económico. Es decir, aplicar prácticas sustentables en los procesos de producción y la corresponsabilidad con la calidad de los entornos a disposición.

La construcción de infraestructura vial produce impactos y/o variaciones en el medio ambiente. Ante demanda de grandes cantidades de concreto, asfalto y otros materiales de construcción de altas emisiones y la necesidad de modificar el entorno, existen amenazas para el equilibrio de los sistemas que la conforman, de manera que, los servicios ecosistémicos presenten modificaciones en sus condiciones naturales (Mendoza Navarro, S. 2021). Las carreteras solares podrían reducir y compensar las emisiones y/o impactos medio ambientales provocados por las carreteras convencionales.

Sin duda, las energías renovables se han convertido en una solución sostenible para varios desafíos, ellas contribuyen con la sostenibilidad energética del mundo por su capacidad de renovación o su proceso de regeneración acelerado, el uso limitado que a diferencia de las fuentes tradicionales pueden agotarse en el tiempo. En consecuencia, se viene priorizando su utilización a través del desarrollo de técnicas y tecnologías incluidas en distintas disciplinas; por ejemplo, los proyectos de ingeniería civil que aprovechan la amplia superficie de carreteras existentes a nivel mundial para generar energía. Aunque este tipo de tecnologías se encuentra en desarrollo, se están construyendo sistemas alternativos a partir de la infraestructura vial.

Un ejemplo de estos sistemas o nuevas tecnologías que se pueden aplicar en la infraestructura vial, serían las llamadas carreteras solares o Solar Roadway. Según Kamran et al. (2018) son una infraestructura de carreteras inteligentes capaz de autogenerar energía en una red eléctrica descentralizada, reduciendo la necesidad de combustibles fósiles en el futuro. Están compuestas de paneles solares diseñados estructuralmente para ser interconectados entre sí para formar un sistema de generación cuyo recurso primario es la radiación solar que incide sobre la carretera. Es decir, resulta ser una carretera con doble propósito que inicialmente brinda un servicio de transporte construida fundamentalmente para la circulación de vehículos pero que también tiene la capacidad de transformar la radiación solar en energía eléctrica para su conexión a red.

En este sentido, las carreteras solares, como fuente de energía eléctrica, pueden ser una opción sostenible en la infraestructura vial, ya que cuentan con un diseño innovador en la estructura de pavimento que le permite proveer un medio de circulación y al mismo tiempo ser bastante viable desde el punto de vista ambiental; A medida que estos sistemas se vuelvan más prominentes se conocerán aplicaciones prácticas de las carreteras fotovoltaicas para establecer suministros de energía más convenientes y sostenibles, como suplir la demanda energética en zonas rurales no interconectada, sectores residenciales y comerciales (Shaikh et al. 2019; Zhang et al., 2022). Sin embargo, esta iniciativa genera algunas dudas desde lo económico, el costo de instalar paneles fotovoltaicos en las carreteras es extremadamente alto y la viabilidad económica de las carreteras fotovoltaicas no se ha sido publicada recientemente (Zhou et al., 2021).

Por otra parte, algunas de las desventajas al implementar este tipo de sistema se encuentra la alta cantidad de recursos para su implementación, por un lado, el costo elevado de instalación del sistema; por otro, la dependencia del sistema a las estaciones del año, en algunos países el invierno reducirá la eficiencia en comparación con el verano. Otra situación, es el alto flujo vehicular de algunas autopistas, que ocasionara

momentos en donde la radiación solar no pueda proyectarse directamente sobre la carretera por la interferencia, está claro que esta tecnología no puede ser instalada en todas las carreteras disponibles.

En contexto con el desarrollo de proyectos e investigaciones a nivel mundial relacionados con la captación y el aprovechamiento de los rayos solares que llegan a la superficie de las carreteras, Liu et al. (2019) propusieron un marco novedoso para predecir y calcular la radiación solar, la energía eléctrica que se puede recolectar de las carreteras y, además, probar la viabilidad de las vías fotovoltaicas para generar energía a vehículos eléctricos. Por otra parte, Benöhr y Gebremedhin (2021) presentaron algunas opciones de implementación de la energía fotovoltaica en las redes de carreteras existentes.

De lo anterior, sobre proyectos implementados, Rios (2016) señala que, en Ámsterdam Holanda, se construyó el Sola Road bike path, el cual consistió en una ciclo ruta de 100 metros de largo por 3,5 metros de ancho compuesta por módulos de concreto de 2.5 x 3.5 metros, los cuales tienen paneles fotovoltaicos que producen energía entre 50 kWh a 70 kWh por metro cuadrado hora al año. De la misma manera, Smart Grids Info (2016) menciona que la compañía Wattway desarrolló en Tourouvre, Francia, el proyecto de construcción de una carretera de 1000 metros de largo con 3000 metros cuadrados de paneles solares, se esperaba que la vía entregará 767 kilovatios-hora (kWh) por día, suficiente energía para alimentar todo el alumbrado público del pueblo de 3.400 habitantes, el proyecto continua funcionando con normalidad pero la eficiencia de la tecnología implementada ha reducido año tras año después de su inauguración. La compañía lo considera un paso hacia la consolidación de esta tecnología que se encuentra en fase de investigación y desarrollo.

En Colombia, según el Departamento Nacional de Planeación (2021), el país dispone de una red vial nacional estimada aproximadamente en 204.389 km de carreteras. De ese total, el 8,30% son vías primarias de competencia nacional; el 22%, constituye la red vial secundaria a cargo de los departamentos; y 69,61% que conforma la red terciaria a cargo de la nación, los departamentos y los entes territoriales. Sobre lo anterior, es preciso señalar que la infraestructura vial juega un papel vital para el avance socioeconómico de un país al conectar los diferentes elementos, sin embargo, estas infraestructuras causan diversos impactos ambientales tanto en el proceso de construcción como en su mantenimiento. Así pues, dichas superficies en Colombia se pueden aprovechar de manera que se satisfaga la demanda de tráfico, se cuide el medio ambiente y al mismo tiempo se genere energía, lo cual sería un aporte en la solución de la crisis energética, y a su vez, se reducirían los daños medioambientales.

En este orden de ideas, este trabajo es importante porque en Colombia son escasas las investigaciones que se han realizado acerca de las carreteras solares. Además, es una manera de relacionar la ingeniería civil y el uso de las energías renovables, específicamente sobre el diseño de sistemas que se pueden aplicar en la infraestructura vial para producir electricidad a partir de las radiaciones solares.

Adicionalmente, para la sociedad es fundamental conocer sobre este tema, debido a que la implementación de estos sistemas beneficia directamente a la comunidad; de igual forma, para la ingeniería es valioso contar con la información aquí relacionada; es decir, reflexionar sobre el diseño de esta infraestructura servirá de incentivo para la creación de nuevos prototipos que cumplan con las condiciones requeridas por los sistema y al mismo tiempo que pueda diversificar el uso de fuentes renovables. Asimismo, para las empresas e investigadores, este tipo de trabajo será de mucho provecho, puesto que ayudaría a indagar acerca de la posibilidad de incluir esta opción a los sistemas existentes las energías renovables.

Finalmente, este artículo se realiza con el objetivo de reflexionar sobre las carreteras solares como alternativa de sostenibilidad vial. Para esto, se llevó a cabo la búsqueda selectiva en bases de datos oficiales de aquellos artículos relacionados con la temática central para responder a las exigencias metodológicas, que permita

la generación de conocimiento a partir de la revisión teórica sobre los estudios de las carreteras solares como una alternativa sostenible que aporta en la producción de energía eléctrica.

Materiales y métodos

El mundo de hoy se encamina hacia mejores condiciones ambientales a través de la reducción de factores degradantes del mismo. Una de esas iniciativas para un medio ambiente más limpio es una mayor aceptación de los recursos renovables en lugar de las formas tradicionales de utilizar los recursos agotables. Solar Roadway es una gran innovación que conduce a energías limpias y un medio ambiente más limpio. La energía solar ha sido objeto de un gran desarrollo en los últimos años, lo que llevó al concepto de Carreteras Solares (Kamran et al., 2018). La energía solar fotovoltaica tiene la ventaja de conversión directa de la luz solar en electricidad y también es muy adecuada para la mayoría de las regiones, por lo que es muy preferida en comparación con otras fuentes de energía renovable.

Según Singh et al. (2019), las carreteras solares son básicamente paneles solares diseñados estructuralmente que pueden presentarse como carreteras convencionales con la alternativa inteligente de generación de energia. Estas carreteras solares resultan versátiles al adaptarse perfectamente a los objetivos de desarrollo sostenible planteados por las naciones unidas (ONU, 2017).

Conviene destacar lo dicho por Kamran et al. (2018), esta nueva tecnología vial no solo consta de paneles solares, sino también de leds y chips de microprocesador. Los paneles solares están formados por células fotovoltaicas que tienen la función de convertir la energía solar en energía eléctrica y cada uno se interconecta con el panel vecino para formar un sistema de carreteras solares. Complementando lo anterior, Shingate et al. (2017) añaden que el diseño debe ser modular y facilitar el mantenimiento, además debe estar hecho de componentes fácilmente disponibles y contar con una longitud y grosor suficiente para adaptarse a la construcción, las pruebas y las unidades de medida de los componentes disponibles.

Ahora bien, Ruiz (2017) destaca que entre las posibles aplicaciones se encuentran autopistas, caminos y carreteras residenciales, que posibilitan la creación de redes de dimensiones considerables. De igual manera, aeropuertos y helipuertos siempre expuestos al sol, pero al tener despejados sus alrededores la energía eléctrica generada podría emplearse para energizar los aviones, la infraestructura de los aeropuertos o los edificios de los helipuertos; además, se podría mejorar la señalización o iluminación para los pilotos.

Estructura del pavimento fotovoltaico

La generación de energía en los pavimentos se debe a la tecnología fotovoltaica instalada en su interior. Depende del efecto fotoeléctrico a través de celdas solares que captan la radiación solar y la convierten en electricidad. La estructura mecánica de las carreteras/pavimentos fotovoltaicos ha sido abordada en varios estudios. (Zhou et al., 2021) descompone en un eje temporal la investigación sobre la estructura del pavimento fotovoltaico incluyendo proyectos desde el año 2009 hasta el año 2020. Una estructura disponible en el mercado es proporcionada por Solar Innova (2020), y se encuentra compuesta por una seria de placas descritas a continuación (ver ilustración 1):

1. **Vidrio frontal:** vidrio templado y ultra transparente que proporciona rigidez al conjunto y protege la cara activa de las células.
2. **Encapsulante superior:** normalmente en PVB o EVA, polímeros de gran adherencia y durabilidad cuya función es encapsular el circuito de células en su parte superior.
3. **Cintas:** La cinta de soldar se utiliza para las conexiones eléctricas entre celdas solares fotovoltaicas.

4. **Célula:** de silicio monocristalino o policristalino de alta eficiencia, es el generador de la energía eléctrica.
5. **Encapsulante inferior:** normalmente en PVB o EVA, polímeros de gran adherencia y durabilidad cuya función es encapsular el circuito de células en su parte superior.
6. **Vidrio trasero:** vidrio templado y ultra transparente que proporciona rigidez al conjunto y protege la cara posterior de las células.
7. **Caja de conexiones:** su función primaria es la transmisión de la energía producida en el módulo, posee un método sencillo de conexión eléctrica del módulo al resto de la instalación. Incluye diodos de protección, cables y conectores (no visible en la ilustración 1).

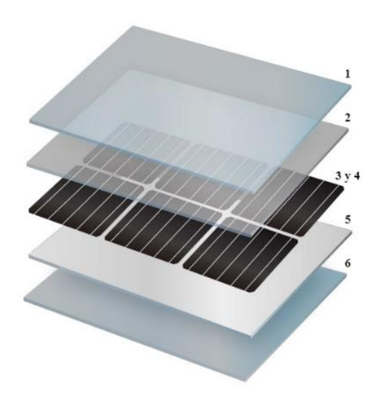


Ilustración 1 estructura pavimento fotovoltaico Solar innova

Fuente: Solarinnova (2022)

Northmore y Tighe (2012) aseguran que lo más importante en el diseño del sistema eléctrico es la selección de las células fotovoltaicas y existen una amplia gama de tecnologías a elegir para esta aplicación, incluidas las células de silicio monocristalino y policristalino; células sensibilizadas con colorante; película delgada; y células solares orgánicas de película fina. Dado que en los proyectos se centran en el diseño estructural del panel, se eligen comúnmente las células de silicio monocristalino, ya que proporcionan la potencia de salida más alta en las células solares comúnmente disponibles en la actualidad. En la revisión más reciente (Zhou et al., 2021), se comprobó la tendencia en el uso de las células monocristalinas. Se valora su aplicabilidad tecnica en distintas modalidades de pavimentos fotovoltaicos y su uso se debe principalmente a su eficiencia de conversión máxima, tasada alrededor del 30% (Andreani et al., 2019).

Por su parte, Northmore y Tighe (2012) destacan la posibilidad de emplear paneles de fibra de vidrio múltiples son capaces de soportar cargas repetitivas en sub-bases deficientes sin fallar. Debido a los requisitos del diseño de su prototipo, eligieron la fibra de vidrio como material estructural ideal para una carretera solar. Además de ser de bajo costo y peso ligero, también es el más fácil de construir un prototipo de investigación, ya que las opciones de aluminio o acero habrían requerido una operación de fundición personalizada, que es un proceso muy costoso y difícil.

En este sentido, Ayushi et al., (2015) recalcan que la estructura para un pavimento fotovoltaico debe estar compuesta primeramente por una capa superficial de la carretera, la cual es un vidrio translúcido y de alta resistencia, el cual es lo suficientemente áspero para proporcionar suficiente tracción, sin embargo, todavía pasa la luz solar a través de las células colectoras solares incrustadas dentro, junto con el LED y elemento calefactor. Así mismo, Shivam et al. (2016) ratifica que las carreteras cuentan con una capa electrónica que

contiene células fotovoltaicas que absorben la energía solar, pero otros prototipos incluyen una placa adicional de microprocesadores con circuitos de soporte para detectar cargas en la superficie y controlar un elemento calefactor que podrían reducir o eliminar la nieve o el hielo.

Desde el punto de vista electrico, la energia generada por las células fotovoltaicas circula por el campo que apoyado en la tensión y potencia establecida por la conexión serie -paralelo permite obtener cantidades significativas de energia que es transmitida por el cableado electrico a una caja de conexiones que interactúa con un inversor luego con una carga, con baterías o directamente con una carga (sin necesidad de inversor), por ello puede conectarse directamente con edificios. Las carreteras solares no pueden almacenar energia por si mismas, sin embargo, pueden conectarse con sistemas de almacenamiento de energía que acumulan la potencia generada para después ser aprovechada, como baterías y alumbrado público.

En comparación con la estructura de pavimento convencional que estan formadas por capas de resistencia decreciente con la profundidad y se compone de una capa de rodamiento (que puede ser asfáltica o de hormigón), la base y subbase apoyado todo este conjunto sobre la subrasante. De igual forma, los pavimentos fotovoltaicos cuentan con una estructura capaz de proveer una superficie de rodamiento al tránsito y distribuir las cargas aplicadas por el mismo, sin que se sobrepasen las tensiones admisibles de las distintas capas del pavimento.

Experiencias de carreteras solares

Según Coutu et al. (2020), la compañía Carreteras solares®, Inc. (SR) propuso una nueva tecnología de pavimento solar (es decir, paneles solares para carreteras (SRP)) como material alternativo y fuente de energía. Para usar SRP en las vías públicas, se llevaron a cabo cuatro pruebas para evaluar la viabilidad de los SRP como material de reemplazo de la calzada con el beneficio adicional de generar energía eléctrica. Específicamente, probaron las propiedades mecánicas del material de pavimento único en ambientes de agua sumergida, bajo condiciones de temperatura extremas, bajo condiciones de carga dinámica y aplicando esfuerzo cortante. El acondicionamiento de la humedad y la prueba de congelación/descongelación mostraron que las condiciones climáticas extremas no tienen un efecto adverso significativo en los SRP.

Adicionalmente, en las pruebas de vehículos pesados, no se encontraron daños físicos en los paneles solares. Los datos recopilados mostraron que los SRP son resistentes a la deformación bajo cargas de corte. Los resultados de las pruebas de cizallamiento no se pudieron comparar directamente con las normas ASTM publicadas debido a la naturaleza y/o geometrías únicas de los SRP. En conclusión, los resultados de las cuatro pruebas muestran que los SRP (Solar Panels for Roads) actuales son robustos, resistentes y funcionales cuando se someten a condiciones de prueba del "mundo real".

Del mismo modo, Dhoke y Ghutke (2017) resaltan que la implementación de un sistema de carreteras solares se ha logrado antes en pequeñas pruebas de prototipos. Cerca de Normandía se ejecutó un proyecto conocido como Watt Way, creado por la empresa francesa de infraestructura Colas. Este exitoso ejemplo de una calzada solar tiene un kilómetro de longitud y contiene aproximadamente 30,000 pies cuadrados de paneles solares que se utilizan para alimentar las farolas locales. Watt Way se construyó colocando los paneles solares planos prefabricados sobre la calzada de asfalto que ya estaba en su lugar. Ratificando un método muy eficiente de instalar un sistema Solar Roadway ya que las carreteras asfaltadas existentes no tendrán que ser removidas o reemplazadas por completo siempre que estén en buenas condiciones.

Con respecto a lo anterior, los autores afirman que al final se ahorrará costos de construcción, tiempo y cantidad de desechos producidos y que, en el futuro, las carreteras normales pueden ser reemplazadas por carreteras solares, pero se requiere una gran inversión inicial. La alternativa de la calzada solar podría hacerse a un costo menor con un retorno de energía mientras se elimina el sistema antiguo. Dado que las

carreteras antiguas están programadas para estar en mantenimiento, el proceso de colocación de carreteras solares podría ocurrir sin problemas.

En otro caso, Efthymiou et al. (2016), realizaron un proyecto de desarrollo y ensayo del pavimento fotovoltaico para la mitigación de islas de calor. Por ello, su diseño fue por motivos puramente experimentales (dimensiones 3,5x1,3m) de dos paneles fotovoltaicos policristalinos de diferente tensión. Sobre ellos se colocó un vidrio de seguridad triplex con serigrafía antideslizante, PVB estándar de 1,14 mm. Para el estudio, se mide la temperatura superficial del asfalto, el pavimento fotovoltaico y las superficies del suelo utilizando un termómetro de contacto, desde la mañana hasta el mediodía, cada hora, durante varios meses (verano-otoño-primavera).

Con el análisis de los resultados obtenidos a través del seguimiento y las simulaciones detalladas, se demuestra que la técnica de mejora micro climática considerada ha ayudado a disminuir sustancialmente tanto la temperatura superficial como la temperatura ambiente hasta 5 °K y 2 °K respectivamente frente a los pavimentos convencionales.

Desde un punto de vista estructural e ingenieril, se tiene que Hermamathi et al. (2016), han evaluado la fabricación de un camino rural que incorpora paneles solares y donde analizaron elementos finitos del modelo de pavimento utilizando el software ANSYS y aplicaron cargas para caminos rurales según los estándares del IRC. Investigaron parámetros como la tensión, la deformación. Los resultados estuvieron dentro de los límites permisibles.

Por otra parte, Liu et al. (2019) propusieron un marco novedoso para predecir y calcular la radiación solar y la energía eléctrica que se puede recolectar en las carreteras. Las imágenes de Google Street View se recopilaron para medir la obstrucción del cielo de las carreteras que está integrado con el modelo de radiación solar para estimar la capacidad de recepción de irradiación. Además de la obstrucción del cielo, también se tuvo en cuenta el impacto de las condiciones del tráfico y las situaciones meteorológicas en el cálculo. A partir del trabajo desarrollado, los autores elaboraron mapas de radiación en diferentes épocas del año para analizar la distribución fotovoltaica de las carreteras.

Para probar la viabilidad de este marco, se tomó Boston como caso de estudio. Los resultados mostraron que las carreteras de Boston pueden generar abundante electricidad para todos los futuros vehículos eléctricos de la ciudad. Además, las carreteras principales que atraviesan Boston exhiben un mejor potencial de generación de energía y el efecto de las condiciones del tráfico es limitado. El marco de cálculo confirma que la utilización de paneles solares como superficies de carreteras es un gran complemento de la energía de la ciudad con la capacidad única de cargar automóviles en movimiento.

Con énfasis en la rentabilidad, Mwani (2017) realizó la comparación del costo de desarrollo de un kilómetro de carretera asfaltada y una carretera solar en el Reino Unido. Los costos de construcción de un kilómetro de carretera asfaltada dependen de la ubicación, el terreno, el tipo de construcción, el número de carriles, el ancho del carril, la durabilidad, el número de puentes, etc. Con respecto al asfalto, cuesta más construir un camino nuevo que rehabilitar un camino o agregar carriles. Las carreteras cuestan más para construir en áreas urbanas que en áreas rurales. Las carreteras en terreno montañoso son más caras de construir que en terrenos planos.

El autor cotizo los costos medios de construcción de carreteras y sustenta que los costos incrementales de suministro pueden variar considerablemente en la red. Al realizar la estimación de un kilómetro de calzada solar, el costo objetivo de un panel solar para carreteras es de $10,000.00 o £ 6017. 21 y la vida útil de cada panel de carreteras es de 20 años. El tamaño estándar del panel solar de carretera es de 3,66 m por 3,66 m (12 pies por 12 pies). Entonces, basado en el promedio de generación de 4.2kWh por metro

cuadrado (Sunpower, 2013), el panel debería recibir un promedio de 56,28kWh de energía por día (Solar Roadway. In, 2013).

En conclusión, el precio inicial de la carretera solar será más alto que la estructura de la carretera tradicional, sin embargo, el beneficio adicional de generar energía limpia, renovable y estar formado por diferentes materiales podría ayudar a mejorar los aspectos de sostenibilidad de la infraestructura cívica. La alternativa de la calzada solar podría realizarse a un costo menor con un retorno de energía mientras se reemplaza el sistema anterior. Dado que las carreteras antiguas están programadas para estar en mantenimiento, podría llevarse a cabo el proceso de colocación de carreteras solares. Tan pronto como las carreteras solares estén preparadas para el futuro, las carreteras asfaltadas son un callejón sin salida. No hay características redentoras del asfalto que deban obstaculizar el progreso de un nuevo modelo.

También se añade que las carreteras solares responderán a los problemas mundiales en las áreas de contaminación del transporte, contaminación por desechos, contaminación por carbón, apoyo al transporte, seguridad, congestión del tráfico y energía. A medida que el costo prevaleciente de una tonelada de asfalto continúa aumentando, la tecnología de celdas fotovoltaicas se vuelve cada vez más efectiva. Tan pronto como podamos entregar la alternativa a £ 6017. 21 por panel, las carreteras solares habrán superado las tradicionales carreteras asfaltadas en todos los campos de debate.

En resumen, los paneles fotovoltaicos en las carreteras pueden ayudar a mitigar el efecto isla de calor urbano y aumentar el suministro de energía renovable, mejorar la combinación energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Z. Zhou et al., 2015). Sin embargo, como la tecnología fotovoltaica evoluciona y el costo de los sistemas fotovoltaicos continúa disminuyendo, las autopistas fotovoltaicas serán cada vez más importantes para el desarrollo del transporte inteligente, los vehículos eléctricos y otros negocios (Zhang et al., 2022). Algunos investigadores se concentrar en evaluar los beneficios económicos y ecológicos de las autopistas fotovoltaicas y exploran más a fondo las opciones de consumo y distribución de energía de las autopistas fotovoltaicas a escala regional ((Ibíd, 2022).

Ventajas y desventajas de las carreteras solares

En particular, Señor et al. (2016) plantea que dentro de las principales ventajas de las carreteras solares se encuentra el uso de una fuente de energía renovable para producir electricidad. Los autores afirman que la tecnología tiene el potencial de reducir la dependencia de fuentes convencionales de energía como el carbón, el petróleo y otros combustibles fósiles. Además, sustenta que la vida útil de los paneles solares se encuentra entre los 30 o 40 años (con pérdida de eficiencia), otra ventaja señalada es que no requieren el desarrollo de terrenos no utilizados y potencialmente sensibles al medio ambiente.

Sin embargo, Jain (2015) afirma que el factor más molesto de las carreteras solares es el material del que están hechas, es decir, el vidrio. Esta idea errónea se puede desacreditar con bastante facilidad, emplear el vidrio puede ser ventajoso al saber que es 4 veces más resistente que el asfalto normal. Pero, a la vez destaca que el futuro de estas carreteras podría tener utilidades infinitas como: incrustar algún tipo de sensor en algunos de los paneles que podrían ayudar a los científicos en la recopilación de datos y la predicción de terremotos, las Solar Roadways podría usarse como un sistema de alerta y podría ayudar a dirigir el tráfico lejos de un área de terremoto. O, dado que los paneles pueden hacerse sensibles a la presión, se pueden utilizar para aplicaciones en la seguridad.

Por otra parte, Mansukhlal et al. (2018), señalan que dentro de las principales ventajas se encuentra primeramente la renovabilidad, haciendo referencia a que la energía solar es un recurso renovable, seguidamente los autores difieren con Señor et al. (2016) afirmando que las carreteras solares tienen de vida útil unos 20 o 25 años. No obstante, resaltan como desventajas el costo de mantenimiento, la eficiencia

estacional, ya que la generación de la electricidad varía de acuerdo con la estación del clima en la que se encuentre y la necesidad de una gran inversión debido a que el costo de instalación inicial de la carretera es alto.

Aun así, Kulkarni (2013) sustenta que las carreteras poseen beneficios adicionales, en algunos casos pueden constituir una red inteligente incorporada en la infraestructura vial, una nueva inversión importante en la creación de empleo, por los beneficios económicos inherentes al liderazgo global en la construcción de la infraestructura de energía limpia más avanzada, cada dólar invertido en fuentes renovables, en última instancia genera retornos, porque el recurso no se quema ni se pierde. Mas aún, Solar Roadways puede pagar dividendos por el presupuesto, haciendo que el gasto en infraestructura sea más eficiente y reduzca significativamente los costos de electricidad para consumidores y empresas, haciendo que la economía emergente de los vehículos eléctricos sea mucho más asequible y fácil de administrar, sin olvidar los aportes a la sostenibilidad.

A pesar de las anteriores ventajas, inicialmente, los costos de puesta en marcha y mantenimiento de la construcción de las carreteras pueden ser extremadamente altos. Sin embargo, los avances en esta tecnología (con suerte) harán que los costos disminuyan (Zhang et al., 2022). Otro problema que hay que abordar es la eficiencia de los paneles solares. Actualmente, la eficiencia media es motivo de investigación. Otra desventaja está asociada con la superficie de las carreteras solares que acumulan caucho, sal, etc., que bloquean la luz solar.

Las carreteras solares pueden no ser económicas, ya que su costo inicial y de instalación se estima tres veces mayor en comparación con las carreteras convencionales (Singh et al. 2019, Amey et al., 2016), pero si esto se evalúa como una inversión a largo plazo, puede resultar mucho más económico ya que ofrece la oportunidad de generar energía limpia que, por sí sola, tendrá un gran impacto en el clima de manera positiva. Las carreteras solares se consideran inteligentes cuando hacen uso de la energia que producen para optimizar el tráfico agilizando la circulación, reducir el estrés de conductores, mitigar la pérdida de productividad en el trabajo, aportar a la conservación del combustible y evitar accidentes (Amey et al., 2016). Este tipo de proyectos pueden requerir una alta inversión inicial, pero darán sus frutos a largo plazo (Zhang et al., 2022).

Por su parte, Mirabella et al (2019), asegura que dentro de las ventajas de la implementación de los pavimentos solares, se encuentran que éstos pavimentos pueden aprovechar la energía que generan para ser utilizada en diferentes aplicaciones, reduciendo así la contaminación, el consumo de energía y proteger al mismo tiempo la infraestructura vial del deterioro estructural, siendo ésta una técnica innovadora para satisfacer los requisitos energéticos de iluminación de carreteras, señales de tráfico y señales de mensajes variables, al convertir la energía solar irradiada en la superficie de la carretera en energía verde, dando un claro ejemplo de sostenibilidad en la infraestructura vial.

Metodología

Para la realización de este artículo se llevó a cabo una revisión exhaustiva en diferentes bases de datos oficiales, consultando artículos científicos, trabajos de tesis y estudios; además de la organización, sistematización y análisis del conjunto de documentos electrónicos encontrados sobre carreteras solares como una alternativa para la generación de energía eléctrica.

Ahora bien, durante la búsqueda de la información, inicialmente se identificaron las bases de datos de acceso libre disponibles como Dialnet, Researchgate, SciELO, Sciencedirect y Google Académico, las cuales fueron las principales páginas consultadas para la obtención de las referencias que abordan la temática de estudio; seguidamente, al acceder a ellas, se hizo el uso de palabras claves fundamentales para la investigación,

entre las que se incluyeron "carretera solar", "panel solar en carreteras", "infraestructura vial", "carreteras inteligentes", "pavimento fotovoltaico", términos también buscados en inglés que fueron combinados en distintas formas al momento de la exploración, con el objetivo de ampliar los criterios de búsqueda. Posteriormente, se procedió a la lectura, revisión y escogencia minuciosa de los artículos científicos, trabajos y algunas tesis donde se encontró información de gran utilidad para este trabajo.

Para la selección adecuada de los documentos base, se establecieron parámetros de inclusión y exclusión, entre ellos el año de publicación de los artículos (no menor al 2012), la cantidad de veces que fueron citados (mínimo 10 veces) y principalmente que tuvieran información relevante e hicieran alusión a la temática central o alguno de los temas secundarios establecidos. Todo esto permitió aceptar y descartar la información necesaria para la investigación. Teniendo en cuenta lo anterior, se preseleccionaron 42 documentos entre artículos y trabajos de tesis, de los cuales se escogieron 33, de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión.

Al realizar la organización, sistematización y análisis de las referencias bibliográficas seleccionadas y su contenido, se creó un diagrama que comprende la estructura del artículo junto al tema central y subtemas a tratar; además, se realizó una tabla donde se recopiló la información de mayor utilidad de cada uno de los artículos seleccionados, como los autores, el año de publicación de estos mismos, la definición del tema y las posturas de cada autor, de esa manera se sintetiza la información de cada uno de los archivos, se analiza la información que es relevante para el desarrollo de este artículo, a fin de que pueda aportar en la creación de un nuevo conocimiento sobre la composición del pavimento fotovoltaico, viabilidad de la implementación de las carreteras solares, las ventajas y desventajas de las mismas.

Resultados y discusión

Dada la revisión exhaustiva de la información consultada sobre carreteras solares, se encuentra que según Kour y Talwar (2019), "las carreteras solares son básicamente los caminos hechos de material de alta resistencia a la tracción" (p.1). Que coincide de cierta manera con lo escrito por Jain (2015), el cual dice que "las carreteras solares son básicamente carreteras compuestas por paneles de alta resistencia" (p.1632). Por otra parte, Patil et al. (2018) establecen que, "esta carretera inteligente se amortiza mediante la generación de electricidad que reemplaza la carretera de asfalto a base de petróleo" (p. 491); lo que también concuerda con lo descrito por Kamran et al. (2018), los cuales escriben que, "el sistema de carreteras solares resulta ser una carretera inteligente que funcione con energía solar y se amortice mediante la generación de electricidad" (p. 69440).

En cuanto a la rentabilidad de las carreteras solares, Singh et al. (2019) establecen que, "el sistema de carreteras solares, en la actualidad, cuesta alrededor de tres veces más que la carretera de asfalto convencional, pero es más duradero, técnicamente más sólido, más fácil de reemplazar en forma modular y puede pagarse por sí mismo generando más electricidad de la que la economía puede consumir" (p. 351); sin embargo, Shingate et al. (2017) sustentan que, " las carreteras solares se pueden implementar aproximadamente al mismo costo de los sistemas actuales" (p. 348); pero, Patil et al. (2018) establecen que, "las carreteras solares se pueden implementar con un costo adicional mínimo que el sistema actual" (p. 496). Todos estos autores coinciden en que los costos de las carreteras solares pueden ser altos, pero indican que la inversión puede ser rentable al no estar muy lejos del costo de las carreteras convencionales y al ofrecer beneficios adicionales.

Con relación a la estructura del pavimento fotovoltaico que debe tener una carretera solar, tanto Ayushi et al. (2015), como Señor et al. (2016) y Shivam et al. (2016) muestran que necesariamente esta estructura

debe estar compuesta por 3 capas: una capa de vidrio traslúcido y de alta resistencia que es la superficie de la carretera, seguido de una capa electrónica y finalmente una capa de placa base. Estructura resumida que no difiere de la composición actual del pavimento fotovoltaico disponible en el mercado.

Adicionalmente, Shivam et al. (2016) y Señor et al. (2016) indican que para que las carreteras solares tengan éxito, los 3 componentes deben trabajar al unísono. La capa del piso de la calle debe ser lo suficientemente clara para permitir que la luz del sol pase a la capa electrónica que debe generar electricidad, y la capa de la placa base debe determinar hacia dónde debe moverse la fuerza. Considerando al hecho de que las líneas en las carreteras solares son en tecnología LED, la capa de placa base debe asegurarse de que la carretera tenga la electricidad necesaria para funcionar antes de enviar el resto de la electricidad hacia la red.

No obstante, Northmore y Tighe (2012) exponen un prototipo del diseño general de un panel solar para carreteras, donde hay una superficie transparente hecha de vidrio texturizado sobre la que circulan los vehículos, una capa óptica para transmitir la carga alrededor de las células solares y una base para transmitir aún más la carga. a un pavimento, subrasante o base estructural. A partir de lo anterior, se muestra que no incluye ningún integrado LED, evidenciándose que es una propuesta que aún se encuentra en desarrollo y que necesita seguir siendo ensayada para saber si es estructuralmente factible.

Con respecto al tema de viabilidad, de acuerdo con Coutu et al. (2020), Carreteras solares®, Inc. (SR) propuso una nueva tecnología de pavimento solar como material alternativo y fuente de energía. Para evaluar la viabilidad, se probaron las propiedades mecánicas de este material de pavimento único en ambientes de agua sumergida, bajo condiciones de temperatura extremas, bajo condiciones de carga dinámica y aplicando esfuerzo cortante. Se concluye que, si es viable aplicar este tipo de tecnología, los resultados de las cuatro pruebas muestran que los SRP (Solar Panels for Roads) actuales son robustos, resistentes y funcionales cuando se someten a condiciones de prueba del "mundo real".

Haciendo referencia al ejemplo propuesto por Hermamathi et al. (2016), donde se llevaron a cabo estudios similares a los realizados en el caso anterior, se evaluó la fabricación de un camino rural que incorpora paneles solares, para esto, se realiza un análisis de elementos finitos del modelo de pavimento utilizando el software ANSYS y se aplican cargas para caminos rurales según los estándares del IRC. El pavimento se analizó para validar la deflexión del pavimento para diversas condiciones de carga vehicular. Los autores determinan que los resultados obtenidos con el software ANSYS demuestran que las deformaciones y la tensión en el pavimento están dentro de los límites permitidos, lo que demuestra que se protege el pavimento de dañarse para la condición de carga dada.

Por otra parte, en un proyecto conocido como Watt Way, se construyó la llamada carretera solar simplemente colocando los paneles solares planos prefabricados sobre la calzada de asfalto que ya estaba en su lugar. Los autores consideran, que esta es la forma más eficiente de instalar un sistema Solar Roadway, ya que las carreteras asfaltadas existentes no tendrán que ser removidas o reemplazadas por completo siempre que estén en buenas condiciones. Además, al final se ahorrará costos de construcción, tiempo y cantidad de desechos producidos (Dhoke y Ghutke, 2017). La investigación anterior, contrasta con una realizada en la India, donde se realiza un estudio para evaluar la viabilidad de las carreteras solares. Los autores afirman que, las Solar Roadways en la actualidad no son factibles para implementarse a gran escala, principalmente, debido a la muy baja eficiencia del panel solar y al muy alto costo inicial, teniendo en cuenta, además, que la eficiencia del panel solar también fluctúa a lo largo del día (Kohak et al, 2019).

En otro caso, Efthymiou et al. (2016), realizaron un proyecto que trata sobre el desarrollo y ensayo del pavimento fotovoltaico para la mitigación de islas de calor. Con el estudio se demuestra que la técnica de

mejora micro climática considerada ha ayudado a disminuir sustancialmente tanto la temperatura superficial como la ambiental; además, aseguran que los pavimentos fotovoltaicos se pueden utilizar para proporcionar carga de base suplementaria y electricidad de pico de potencia para áreas urbanas abiertas. Por otro lado, hablando un poco de qué tan rentable puede ser la aplicación de este tipo de tecnología, Mwani (2017), realizó la comparación del costo de desarrollo de un kilómetro de carretera asfaltada y Solar Roadway en el Reino Unido. El precio inicial de la carretera solar será más alto que la estructura de la carretera tradicional, sin embargo, el beneficio adicional de generar energía limpia y renovable y estar formado por diferentes materiales podría ayudar a mejorar los aspectos de sostenibilidad de la infraestructura cívica.

En cuanto a las ventajas y desventajas de implementar esta tecnología, se tiene que Singh et al. (2019), afirma que la principal ventaja de las carreteras solares es que producen energía a partir de una fuente renovable, a diferencia de otros métodos y tecnologías, que utilizan fuentes convencionales y no renovables para la generación de energía; ayuda a reducir la dependencia del carbón, el petróleo y otros combustibles fósiles en una gran fracción y además, existe una gran diferencia en la vida media de las carreteras solares y la vida media de las carreteras convencionales de asfalto y hormigón. La vida media de las carreteras solares es de 25 a 40 años, mientras que en las carreteras convencionales es de más de 50 años (con mantenimiento), sin embargo, el mantenimiento de las carreteras solares es menos frecuente y con menos complicaciones que el mantenimiento de las carreteras convencionales.

Lo anterior es semejante a lo planteado por Mansukhlal et al. (2018), quienes aseguran que dentro de las principales ventajas se encuentra la renovabilidad, estos autores proyectan que la vida útil de las carreteras solares entre 20 y 25 años y coinciden con Amey et al. (2016), al reafirmar lo descrito por los autores anteriores, una de las principales ventajas es el uso de una fuente de energía renovable para producir electricidad, por tanto, destacan el potencial de reducir la dependencia de fuentes convencionales de energía para la iluminación y funcionamiento de las carreteras.

Por otra parte, Singh et al. (2019), asegura que solo hay una gran desventaja que tiene un efecto drástico en el uso de esta tecnología, los costos iniciales de instalación y mantenimiento de los paneles solares son muy altos. Por lo tanto, los autores indican que no se pueden construir en países subdesarrollados, pobres y económicamente débiles. Pero, indica que los avances en esta tecnología pueden ocasionar una caída de los precios, lo que coincide con lo afirmado por Mansukhlal et al. (2018) quienes afirman que dentro de las principales desventajas se encuentran el costo de mantenimiento, ya que debe ser anual, la eficiencia estacional, ya que la generación de la electricidad varía de acuerdo a la estación en la que se encuentre y la necesidad de altos ingresos, debido a que el costo de instalación inicial de la carretera es alto.

En relación a las aplicaciones de la energía que sería obtenida a través de los paneles solares, Mirabella et al. (2019) afirma que los paneles pueden aprovechar la energía que generan, para ser utilizada en diferentes aplicaciones, reduciendo así la contaminación y el consumo de energía y proteger al mismo tiempo la infraestructura vial del deterioro estructural, siendo ésta una técnica innovadora para satisfacer los requisitos energéticos de iluminación de carreteras, señales de tráfico y señales de mensajes variables, al convertir la energía solar irradiada en la superficie de la carretera en energía verde; mediante mecanismos y circuitos adecuados, el sistema puede calentar y enfriar los edificios vecinos reduciendo su dependencia de las tecnologías tradicionales de calefacción y refrigeración, que en su mayoría dependen de la electricidad y/o el gas.

Además, Shaikh et al. (2019), plasman en su estudio que dentro de las ventajas que puede proporcionar está el suministro de energía eléctrica a los negocios y hogares circundantes a la infraestructura vial. Los autores afirman que en el futuro pueden reemplazar algunas centrales eléctricas que operan con combustibles fósiles y masificarse como una red inteligente en cada nación. La tecnología resulta respetuosa

con el medio ambiente y no contamina, no produce gases de efecto invernadero, tiene una vida útil alrededor de 20 a 30 años.

Conclusiones

A partir de este trabajo, se ha logrado presentar y reflexionar sobre la información existente de los estudios relacionados con la implementación de las carreteras solares, la cual es útil en el desarrollo de nuevas investigaciones y a la vez genera un nuevo conocimiento en diseños innovadores de estructuras de pavimento amigables con el medio ambiente.

Del mismo modo, varios de los autores luego de evaluar los sistemas de carreteras solares, concluyen que, si es viable la aplicación de este tipo de tecnología, primeramente, porque al ser aplicadas cargas dinámicas y esfuerzo cortante bajo diferentes condiciones de temperatura, los resultados demuestran que estos sistemas son robustos, resistentes y funcionales cuando se someten a condiciones de prueba del mundo real; en segundo lugar, las deformaciones y la tensión en el pavimento están dentro de los límites permitidos, lo que demuestra que se protege el pavimento de dañarse para la condición de carga dada; y tercero, se evidencia que no hay efectos adversos significativos por factores climáticos.

Por último, con base a los estudios y proyectos revisados, se ha concluido que, a pesar del alto costo inicial de implementar el sistema de carreteras solares, esto no sería nada, comparado con los daños que se ocasionan al llevarse a cabo la construcción de carreteras convencionales y los beneficios que se obtienen de las carreteras solares. Teniendo en cuenta que la construcción de una carretera convencional no solo genera costos relacionados con los tratamientos frecuentes, sino también, la contaminación ocasionada por la combustión del asfalto (derivado de un combustible fósil, concreto y otros altos en carbono) antes del proceso de pavimentación, la gran energía requerida para lograr calentar la mezcla asfáltica, entre otras cosas. Mientras que las carreteras solares están formadas por materiales sostenibles empleados en doble propósito, el costo de tratamiento o mantenimiento es menor, su periodo de vida útil es mayor, generan energía limpia y renovable, lo que ayuda a mejorar los aspectos de sostenibilidad del entorno donde se implementan.

Literatura citada

Amey, D. K., Seema, S. S. & Nandkumar, K. P. (2016). A Study on Roads Using Solar Energy. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, Volume 4 Issue XII, pp. 379-380*, ISSN: 2321-9653. https://www.ijraset.com/fileserve.php?FID=6010

Ayushi, M., Neha, A. y Anjali, T. (2015). Carreteras solares: el futuro de las carreteras, *Revista internacional de investigación avanzada en ciencia, ingeniería y tecnología (IARJSET), 2(1),* 2393-8021. http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/cook2/docs/mehta.pdf

Benöhr, M. y Gebremedhin, A. (2021). Sistemas fotovoltaicos para redes de carreteras. *Revista Internacional de Tecnología Innovadora y Ciencias Interdisciplinarias, 4 (2),* 672-684. http://www.ijitis.org/index.php/ijitis/article/view/110/78

Coutu, R., Newman, D., Munna, M., Tschida, J., & Brusaw, S. (2020). *Engineering Tests to Evaluate the Feasibility of an Emerging Solar Pavement Technology for Public Roads and Highways. Technologies, 8(1), 9.* https://doi.org/10.3390/technologies8010009

Departamento Nacional de Planeación. (2021). Declaración de importancia estratégica de los proyectos de inversión del programa vías para la conexión de territorios, el crecimiento sostenible y la reactivación 2.0 - Documento CONPES 4039. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4039.pdf

Dhoke, M. y Ghutke, P. (2017). Innovative of Power generation with PV Technology on Solar Roadways. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 4(3),* 54-56. http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV4I3010.pdf

Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar Energy, 130,* 148-160. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.054

Hermamathi, A., Usharani M., Simon S., Lavanya I & Raja, M. (2019). Numerical Analysis of Solar Roadways using ANSYS. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 9(1),* 384-388. https://1library.net/document/4zpld5oq-numerical-analysis-of-solar-roadways-using-ansys.html

Jain, V. (2015). Viability of Solar Roads in India. *Journal of Basic and Applied Engineering Research, 2 (18),* 1632-1634. https://www.researchgate.net/publication/335442557_Viability_of_Solar_Roads_in_India

Kamran, A., Salman, A., Loveneesh, T. & Yuvraj, S. (2018). A Review on Future Highway (The new era of smart roadways). *International Journal of Current Research, 10(05),* 69440-69444. https://www.journalcra.com/sites/default/files/issue-pdf/30735.pdf

Kohak, P. G., Kandake, R. A., Patekar, V. P., & Ghorpade, D. S. (2019). A Review on Design and Fabrication of a Solar Roadways. *International Research Journal of Engineering and Technology, 6(9),* 2049-2054. https://www.irjet.net/archives/V6/i9/IRJET-V6I9321.pdf

Kour, K. y Talwar, L. (2019). Go Green with Solar Roadways: - A Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 8(10),* 10005-10011. http://www.ijirset.com/upload/2019/october/18_Go.PDF

Kulkarni, A. (2013). "Solar Roadways" – Rebuilding our Infrastructure and Economy. *International Journal of Engineering Research and Applications, 3(3),* 1429-1436. https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue3/IJ3314291436.pdf

Liu, Z., Yang, A., Mengyao, G., Jiang, H., Kang, Y., Zhang, F. & Fei, T. (2019). Towards feasibility of photovoltaic road for urban traffic-solar energy estimation using street view image. *Journal of Cleaner Production,* 10,1016. https://www.researchgate.net/publication/332578962

Lucio Claudio Andreani, Angelo Bozzola, Piotr Kowalczewski, Marco Liscidini & Lisa Redorici (2019) Silicon solar cells: toward the efficiency limits, *Advances in Physics: X,* 4:1, DOI: 10.1080/23746149.2018.1548305

Mansukhlal, C. J., Sanjay, C. P., Rao, M. V., Kalyankar, S. H. & Abhale, B. G. (2018). Solar Panel Technology in Highway. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering, 4(10),* 27-30. http://www.ijfrcsce.org/index.php/ijfrcsce/article/view/1758

Mendoza Navarro, S. (2021). Impactos ambientales de la infraestructura vial en el caribe colombiano, un análisis desde la perspectiva regional. *Corporación Universidad de la Costa.*

Mirabella, S., Kehagia, F. & Psomopoulos, C. (2019). Solar pavement: a new source of energy. *Bituminous Mixtures and Pavements VII* (pp.441-447). https://www.researchgate.net/publication/333837210_Solar_pavement_a_new_source_of_energy#:~:text=Thermal%20and%20electrical%20collector%20solar,the%20same%20road%20pavement%20infrastructure

Mwani, D. (2017). Estudio de viabilidad e investigación para reemplazar la calzada de asfalto en Solar Roadway. Instituto Mediterráneo de Estudios Regionales - MIRS. https://www.mirs.co/details.aspx?jimare=60

Northmore, A. y Tighe, S. (2012). Innovative Pavement Design: Are Solar Roads Feasible? [conferencia]. Proceedings of the 2012 Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada, Fredericton, Canadá. http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2012/docs/session3/northmore.pdf

ONU. (2017). La Agenda para el Desarrollo Sostenible. In *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/

Patil, A. R., Khairnar, V. Y., Kokate, A. V., & Narkhede, R. S. (2018). A novel route for construction of smart highways by using photovoltaic solar panels. *International Journal of Research and Analytical Reviews, 5(3), 491-496*. https://ijrar.org/papers/IJRAR1903968.pdf

Ríos, G. N. (2016, noviembre). Carreteras Solares. Naturaleza sin tóxicos. https://naturalezasintoxicos.files.wordpress.com/2017/03/cc-carreteras-solares-2016.pdf

Ruiz Fernández, E. (2017). Superficies horizontales captadoras de energía. Carreteras solares [Tesis de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital. http://oa.upm.es/47529/1/TFG_Ruiz_Fernandez_Elia.pdf

Señor, A., Johny Renoald, V., Hemalatha, R., Punitha, M. y Sasikala, M. (2016). Carreteras solares: la reconstrucción del futuro Infraestructura y Economía. *Revista internacional de investigación eléctrica y electrónica,4(2),14-19,* ISSN 2348-6988. https://www.academia.edu/29381719/Solar_Roadways_The_Future_Rebuilding_Infrastructure_and_Economy

Shaikh, S., Gaikwad, J., Shaikh, M., Shaikh, M., Gadekar, A & Chaudhari, A. (2019). Survey on Smart and Efficient Transportation (Use of Solar Panels on Highways). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 8(3),* 3481-3486. http://www.ijirset.com/upload/2019/march/262_final%20publication%20paper%20.pdf

Shingate, V., Wangade, R. & Manedeshmukh, A. (2017). Study on Solar Roadway. *International Journal of Advance Research, Ideas, and Innovations in Technology, 3(6),* 345-348. https://www.irjet.net/archives/V6/i9/IRJET-V6I943.pdf

Shiwam, P., Sapna, K. & Varsha, P. (2016). Solar Roadway. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, 2(3),* 3668-3674. http://ijariie.com/AdminUploadPdf/SOLAR_ROADWAY_ijariie2646.pdf

Singh, A., Sachin, K. & Namdev, V. (2019). Solar Roadways: A significant Infrastructural reform. *International Research Journal of Engineering and Technology, 6(9),* 351-354. https://www.irjet.net/archives/V6/i9/IRJET-V6I943.pdf

Smart Grids Info. (2016, 28 de marzo). Wattway, la carretera solar para recargar Vehículos Eléctricos. https://www.smartgridsinfo.es/2016/03/28/wattway-la-carretera-solar-para-recargar-vehiculos-electricos

Solar Innova. (2020). Pavimento Fotovoltaico. https://solarinnova.net/es/productos/fotovoltaica/modulos/bipv/pavimento#materiales

Zhang, K., Chen, M., Yang, Y., Zhong, T., Zhu, R., Zhang, F., Qian, Z., Lü, G., & Yan, J. (2022). Quantifying the photovoltaic potential of highways in China. *Applied Energy*, *324*, 119600. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119600

Zhou, B., Pei, J., Nasir, D. M., & Zhang, J. (2021). A review on solar pavement and photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *93*, 102753. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102753

Zhou, Z., Wang, X., Zhang, X., Chen, G., Zuo, J., & Pullen, S. (2015). Effectiveness of pavement-solar energy system – An experimental study. *Applied Energy*, *138*, 1–10. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.10.045